

УДК 539.9

**Д. Ю. Федотов*, В. А. Федоров, Т. Н. Плужникова,
С. А. Сидоров, А. В. Яковлев, М. В. Бойцова**

Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов

*dmitry_989@mail.ru

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. *В. А. Федоров*

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ СБРОСА МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Установлено, что кроме термического расширения сброс механической нагрузки в образцах аморфного металлического сплава при пропускании импульсного тока может быть обусловлен обратимой стадией направленной структурной релаксации.

Ключевые слова: металлическое стекло, аморфные сплавы электроимпульсное воздействие, деформация, структурная релаксация.

**D. Y. Fedotov, V. A. Fedorov, T. N. Pluzhnikova, S. A. Sidorov,
A. V. Yakovlev, M. V. Boitsova**

MECHANISMS OF FORMATION OF MECHANICAL STRESS RELIEF IN AMORPHOUS METAL ALLOYS UNDER ELECTRIC PULSE ACTION

It is established that in addition to thermal expansion mechanical load relief in samples of amorphous metal alloy when passing a pulse current is also due to the reversible stage of directed structural relaxation.

Key words: metal glass, amorphous alloy, electric impulse action, deformation, structural relaxation.

В качестве материалов для исследования выбран ленточный аморфный металлический сплав на основе кобальта

© Федотов Д. Ю., Федоров В. А., Плужникова Т. Н., Сидоров С. А., Яковлев А. В., Бойцова М. В., 2020

($\text{Co}_{78,5}\text{Ni}_{4,73}\text{Fe}_4\text{Si}_{7,25}\text{Mn}_{1,88}\text{B}_2\text{Cr}_{1,5}$) и нанокристаллический сплав на основе железа ($\text{Fe}_{80,22}\text{Si}_{8,25}\text{Cu}_{1,44}\text{Nb}_{10,09}$). Размеры образцов $40 \times 3,5 \times 0,02$ мм.

Эксперименты по одноосному растяжению проводили на электромеханической машине для статических испытаний Instron-5565. Во время деформации образца подавали импульсы тока плотностью от $1 \cdot 10^8$ до $5 \cdot 10^9$ А/м², длительностью $\tau_1 \sim 2,5$ мс и $\tau_2 \sim 5$ мс. Нагрев образцов в течение всего процесса деформации контролировали лазерным измерителем температуры Testo-845 с частотой 10 с⁻¹.

Установлено, что при деформации образцов АМС во время пропускания импульсного электрического тока на диаграммах $\sigma - \epsilon$ наблюдается кратковременный (примерно 1,1 с) сброс механического напряжения с последующим полным восстановлением хода зависимости $\sigma - \epsilon$. Кроме того, пропускание импульсного электрического тока вызывает скачкообразное кратковременное увеличение температуры образцов АМС за счет выделения джоулева тепла. Учет теплового действия тока, включающий в себя точное измерение нагрева образцов и оценку влияния этого нагрева на деформацию образцов, является существенным моментом в исследовании причин сброса механического напряжения.

С этой целью проводили деформацию образцов по следующей схеме. Первоначально образец подвергали растяжению при постоянной (0,1 мм/мин) скорости движения захватов при комнатной температуре. При достижении механической нагрузки, соответствующей моменту пропускания импульсного тока, деформацию прекращали, но нагрузку при этом с образцов не снимали. После этого осуществляли печной нагрев образца (время нагрева не более 5 секунд). Далее образец продолжали нагружать с той же скоростью деформации, что и на первом этапе, но уже при повышенной температуре. Эксперименты показали, что на всех исследуемых сплавах зависимость снижения механического напряжения $\Delta\sigma$ от величины нагрева (ΔT) имеет линейный характер. За счет повышения температуры также наблюдается сброс механического напряжения на диаграммах нагружения.

Из диаграммы можно определить значения $\Delta\sigma$ и ΔT и, используя закон Гука и закон теплового расширения для изменения длины, получаем следующие значения. Согласно закону Гука, применимому к упругой деформации, наблюдаемой в нашем случае, получаем $\Delta l_y = (\Delta\sigma \times l_0) / E = 25,5 \times 10^{-5}$ м. Закон теплового расширения дает другое значение $\Delta l_T = \alpha \times l_0 \times \Delta T = 6,3 \times 10^{-5}$ м. Как показали расчеты учет

теплового действия тока, включающий в себя точное измерение нагрева образцов и оценку влияния этого нагрева на деформацию образцов, дает 25 % от общей величины сброса механического напряжения. Из полученных значений следует, что изменение длины, полученное только за счет сброса механического напряжения на 50 % превышает значение, полученное при термическом расширении. Это говорит о том, что в образцах, помимо термического расширения, происходят другие обратимые процессы, ответственные за сброс механического напряжения, например, конкурирующие процессы направленной структурной релаксации, процессы топологического упорядочивания, которые могут быть ответственны за такое поведение механического напряжения в исследуемом материале.

Для сплава АМАГ-200 величины сбросов механического напряжения, вызванных импульсным током и нагревом в печи, одинаковы при одной и той же температуре, что может быть связано с особенностями строения материала, который находится в более стабильном состоянии по сравнению с АМС.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
(грант № 18–01–00513).*